

# Va fi înlocuită elec cu electronica pe

Prezentul articol este o continuare a seriei începute cu "Europa mizează pe tehnologiile generice esențiale", Market Watch, 15 aprilie – 15 mai 2012, pg. 36-37. În concepția "Orizont 2020", noul plan de cercetare, dezvoltare și inovare al Uniunii Europene, competitivitatea industrială nu poate fi asigurată decât pe baza Tehnologiilor generice esențiale (Key Enabling Technologies, KET). Vom încerca să ilustrăm faptul că aceste tehnologii (Nanotehnologia; Micro- și nanoelectronica, incluzând semiconductorii; Biotehnologiile industriale; Fotonica; Materialele avansate; Tehnologiile avansate de fabricație) sunt strâns legate între ele, utilizând un exemplu spectaculos, cel al grafenei. Grafena este un material avansat, care ilustrează cel mai bine nanotehnologia, printr-un control la scară atomică a unor suprafețe care ajung la scară macro. Acest material promite schimbări cu caracter revoluționar în nanoelectronică și în fonică.

## Siliciul și carbonul: materiale înrudite

Carbonul formează cristale de **diamant** cu o structură a rețelei cristaline identică cu cea a siliciului (ambele elemente sunt tetravalente). Acest material (extrem de scump) este însă un izolant și nu un semiconductor. Aici ne interesează însă o altă formă de cristalizare a carbonului, **grafitul**, care se găsește în natură mult mai frecvent decât diamantul. Grafitul este format dintr-o "stivă" de straturi monoatomice de grafenă (un cristal de grafit de un milimetru grosime conține un milion de straturi de grafenă). În interiorul stratului atomii sunt foarte strâns legați între ei într-o structură hexagonală (bazată pe o legătură chimică trivalentă). Aderența (coeziunea) dintre aceste straturi este foarte redusă, de aceea un creion lasă urme pe hârtie: mina sa este formată de grafit, care se exfoliază în momentul în care vârful creionului este târât pe suprafața hârtiei.

Primii care au reușit să izoleze și să studieze experimental stratul de grafenă au fost **Andre Geim și Konstantin Novoselov** (premiul Nobel pentru Fizică din 2010). Ei au procedat la exfolierea repetată a grafitului utilizând... o panglică adezivă (scotch). Ingeniozitatea celor doi a constat în faptul că

straturile obținute prin exfoliere (la început multiatomice) au fost transferate pe "oxidul de siliciu" de pe suprafața siliciului, ceea ce a permis evidențierea proprietăților optice. Diferențele de culoare au permis în final identificarea unor "așchii" de grafenă, strat monoatomic de atomi de carbon. Geim și Novoselov au reușit să construiască și un tranzistor care exemplifică avantajele grafenei (Science, octombrie 2004). Mobilitatea electronilor (raportul dintre viteza și câmpul electric aplicat) în stratul pur de grafenă este cu două ordine de mărime peste cea din siliciu, ceea ce a permis speculații legate de posibilitatea de a realiza tranzistoare mai mici și mai rapide, depășind „bariera” fizică

## „Marele avantaj al grafenei este compatibilitatea cu tehnologia microelectronică a siliciului.”

în realizarea unor circuite electronice integrate mai performante, construite în prezent cu tehnologia nanoelectronică, bazată pe monocristalul de siliciu. În plus, grafena are și o conductibilitate termică mult mai bună decât cea a siliciului, material în care complexitatea circuitelor este limitată și de necesitatea eliminării puterii disipate.

Există mai multe metode de a "fabrica" grafena. Cea inițială, de exfoliere a cristallului de grafit, este utilă pentru experimente de laborator, nu și pentru producție. Exfolierea în fază lichidă, cu ultrasunare, este un proces ieftin, dar fragmentele de grafenă sunt mici, cu dimensiuni laterale de la câțiva nanometri la câțiva micrometri. Metoda permite fabricarea unor ceramuri de grafenă, utile pentru realizarea unor electrozi transparenți și chiar a unor tranzistoare cu straturi subțiri „tipărite” cu jet de cerneală. Tehnica de depunere chimică din faza de vapori (CVD chemical vapor deposition) este folosită pentru creșterea grafenei pe substrat metalic, de exemplu o folie de cupru. Această grafenă este transferată mecanic (prin rulare) pe o folie de polimer și transportată apoi pe substratul final (după ce cuprul este îndepărtat chimic). S-au putut obține astfel straturi cu dimensiunea de 50 cm și depunerea grafenei pe o întreagă plachetă de siliciu a devenit posibilă. Într-adevăr, marele avantaj al grafenei este compatibilitatea cu tehnologia microelectronică a siliciului, folosirea noului material permițând noi aplicații.

# tronica pe siliciu carbon?

## Tranzistoarele cu grafenă și aplicațiile în electronică

Structura din Figura 1, în care tranzistorul cu grafenă reproduce în mare un MOSFET (Metal Oxid Semiconductor Field-Effect Transistor), este realizată în tehnologia siliciului, cu o "așchie" de grafenă transportată și depusă pe bioxidul de siliciu ce acoperă substratul de siliciu. Contactele de sursă și drena, oxidul și contactul de poartă (gate) etc. sunt depuse și configurate cu tehnologii standard.

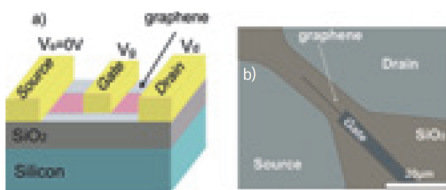


Fig. 1 (a) Schiță a unei secțiuni prin dispozitiv; (b) Micrografie a dispozitivului văzut de sus. După M.C. Lemme et al., ECS Transactions, 11, 413 (2007)

Tranzistorul cu grafenă din Fig. 1 **nu poate fi blocat**, ceea ce împiedică construcția unor comutatoare electrice, care sunt circuitele de bază ale actualelor scheme digitale. Se pot folosi fâșii de grafenă de lățime foarte îngustă (de pildă, 10 nanometri), dar mobilitatea electronilor scade. Artificiile care permit realizarea unor comutatoare fac până la urmă tehnologia neatractivă.

Cercetarea s-a reorientat spre **electronica analogică**. Tranzistorul din Figura 2 (realizat la IBM Center, N.Y.) folosește grafena crescută CVD pe o folie de cupru și transferată pe substrat DLC (diamond-like carbon). S-a demonstrat că frecvența de tăiere este invers proporțională cu lungimea canalului, fiind de 155 GHz pentru lungimea minimă de 40 nm. S-a renunțat la grafena depusă direct pe bioxidul de siliciu (ca în figura 1) deoarece aceasta din urmă influențează negativ mobilitatea electronilor și induce o neuniformitate la nivelul plachetei. Grafena s-a depus pe

DLC, crescut pe bioxidul de siliciu. Toate procesele sunt standard.

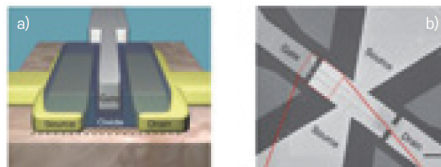


Fig. 2 (a) Vedere schematică laterală; (b) Imagine SEM, văzută de sus. După Y. Wu et al., Nature 472, 72-78 (2011)

## Fotonica și optoelectronica bazată pe grafenă

Proprietățile mecanice și optice ale grafenei sunt încă mai interesante decât cele electronice. Grafena este cel mai subțire material creat vreodată, dar și cel mai rezistent mecanic (de 100 de ori mai bun decât oțelul). Se poate deforma fără să își modifice proprietățile. Este aproape complet transparent, dar complet impermeabil (nu poate fi penetrat nici de către cel mai mic atom, cel de heliu).

**Grafena este o alternativă viabilă la materialele convenționale folosite în optoelectronică, plasmonică și nanofotonică.** Fiind aproape transparentă pentru practic orice lungime de undă și fiind flexibilă (putând fi îndoită), grafena este ideală pentru conductori/contacte transparente. Este de așteptat ca primele aplicații comerciale ale grafenei să fie legate de **electrozii transparenți**, după cum urmează: (a) lăsând lumina să treacă la ecranele tactile (touch screens); (b) colectând curentul dat de celulele solare, fără a împiedica trecerea luminii care generează acest curent; (c) injectând curent în LED-urile organice de putere (OLED), lăsând în același timp fotonii să părăsească dispozitivul. În momentul de față, electrozii transparenți sunt realizați din ITO (indium tin oxide, oxid de indiu și staniu). Dar indiu este material deficitar și prețul său crește, iar ITO este fragil și ca urmare trebuie depus pe un substrat rigid (de pildă sticlă), ceea ce împiedică realizarea unor componente flexibile.

Grafena se comportă, practic, la fel la orice lungime de undă, absorbind aceeași fracțiune a luminii incidente (aproximativ 2,3%) în întregul spectru, de la ultraviolet la infraroșul îndepărtat. Aplicațiile în domeniul teraherzilor sunt deosebit de interesante: radiația penetrează o mare varietate de materiale, dar este neionizantă, ceea ce este un avantaj major (imagistică medicală, dar și controalele de securitate și senzorii de mediu). Detecția în domeniul teraherților se bazează pe rezonanță plasmonică (electronii din grafenă rezonează la o frecvență care corespunde lungimii de undă a luminii incidente), dar se poate dezvolta o întregă componentă bazată pe grafenă, nu numai la recepție, cât și la emisie.

## Perspective

Răspunsul la întrebarea din titlu: **grafena nu va înlocui tehnologia siliciului, ci va crește potențialul acesteia.** Există însă și alte exemple de utilizare. Grafena poate înlocui polimerul semiconductor în "electronica flexibilă". Ea este foarte atractivă pentru construcția de supercapacitori, datorită raportului mare suprafață / volum al electrozilor. Deși explorarea proprietăților grafenei și dezvoltarea aplicațiilor va lua decenii, primele utilizări în produse comerciale vor apărea foarte curând. În linii mari, se așteaptă până în 2016 un progres substanțial în tehnologie (materiale și procese), după care accentul se va pune pe componentistică, iar după 2020 "ștafa" o va prelua integrarea în sisteme. Se prefigurează succesiv (printre altele) electronica și optoelectronica flexibilă; truse medicale "de reparație"; imagistică în domeniul THz; circuite logice ultra-rapide de mică putere; sisteme logice de tip "spintronică".

■ Acad. Dan Dascălu  
CNT-IMT, Centrul de Nanotehnologii,  
INCD-Microtehnologie (IMT-București)